第40卷 第6期
2023年6月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 6
Jun. 2023

新疆大气$PM_{2.5}$来源与潜在贡献源分析

许君利[1]， 韩海东[2]， 王 建[1]

（1. 盐城师范学院苏北农业农村现代化研究院，江苏 盐城 224007；2. 中国科学院西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730000）

摘 要： 利用2021年3月—2022年2月新疆空气质量数据分析$PM_{2.5}$浓度演化特征及其控制因素，结合因子分析和NO_2、SO_2与CO的来源特性辨别物质排放源，并借助基于Hysplit模式的MeteoInfo软件包确定$PM_{2.5}$输送路径和潜在贡献源区分布状况。结果表明：（1）新疆$PM_{2.5}$浓度显著偏高，尤其是冬季平均高达86.16 $\mu g \cdot m^{-3}$。其中，天山北坡经济带$PM_{2.5}$来源主要受周围油气田作业排放及其输送过程中大风扬尘的支配，而其他地区的$PM_{2.5}$主要源于大风扬尘，辅以石油与天然气燃烧排放。（2）天山北坡经济带经油气田作业区气流输送$PM_{2.5}$浓度虽然仅为局地路径的50%，但路径占比达50%，因此，应是区域$PM_{2.5}$来源的重要通道，且$PM_{2.5}$浓度变异系数高达103.6%，是导致雾霾甚至浮尘天气形成的关键因素。哈密盆地与塔里木盆地物质补给路径虽然存在差异，但二者$PM_{2.5}$潜在贡献源区均主要分布在孔雀河流域和罗布泊等地。（3）外源气流受盆地地形作用而演化成辐合/辐散气流，辅以（类）山谷风促进污染物混合，应是天山北坡经济带和塔里木盆地内$PM_{2.5}$演化趋势类似的成因之一。

关键词： $PM_{2.5}$；聚类分析；Hysplit模式；潜在贡献源区；新疆

细颗粒物（$PM_{2.5}$）是影响人类健康的关键空气污染物之一[1]。《2018年欧洲空气质量报告》指出37个国家中有32个国家的68%站点$PM_{2.5}$浓度超过世界卫生组织（WHO）的健康标准(10 $\mu g \cdot m^{-3}$)[2]，而正经历工业化、城市化和汽车产业快速增长的亚洲也是大气颗粒物污染显著的地区[3]。因$PM_{2.5}$浓度和呼吸系统与心血管等疾病引起的居民超额死亡数量显著相关[4]，估算全球归因于$PM_{2.5}$死亡的人数占比高达5.25%[5]。所以，当前人类不仅面临$PM_{2.5}$严重超标的环境压力，还遭受其带来的潜在健康威胁。

人类活动（工业粉尘、道路扬尘和生物与化石燃料燃烧等）和自然演变进程（风扬尘土、火山灰和海盐等）均会排放$PM_{2.5}$，因此，$PM_{2.5}$既可来自不同源的直接释放，也可通过气体排放物的前体物质转化而间接形成[6]，并受地形条件、气候因素、排放源和扩散模式的影响，浓度时空分布与演化过程可呈现明显差异[7]。地处欧亚大陆腹部的新疆高山与沙漠并存，并在远离海洋背景下受西风带、大陆高压、冰川风和山谷风等相互作用[8]，辅以绿洲和能源产业分布与开发不均一，造就了区域之间$PM_{2.5}$浓度变化规律及其来源途径差异显著。目前，关于新疆$PM_{2.5}$的研究，如沙尘气溶胶的组成[9]、健康安全评价[3,6]、浓度建模分析[10-12]和潜在源分析[7,13-14]等多限于单个城市，难以系统了解区域性$PM_{2.5}$浓度的时空分布特点、演化过程及其来源属性，限制了控制$PM_{2.5}$浓度和保护人类健康的有效策略的制定。基于此，在利用新疆46个$PM_{2.5}$站点数据进行聚类分析以获得不同特征区的前提下，对比分析$PM_{2.5}$时空分布状况及其变化特点；利用因子分析与NO_2、SO_2和CO的来源特性[15]，辨别$PM_{2.5}$的物质排放源；进一步借助气团后向轨迹模式（Hysplit）确定$PM_{2.5}$的物质输送路径，并结合潜在源区贡献函数（FSCF）和浓度权重轨迹（CWT）方法探讨其潜在贡献源区[7]，以期为探究新疆空气质量演化过程提供科学参考。

收稿日期： 2022-09-28； **修订日期：** 2022-11-29
基金项目： 中国科学院A类战略性先导科技专项（XDA19070501）；国家自然科学基金项目（41471060）；中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目（SKLCS-OP-2020-7）
作者简介： 许君利（1983-），女，博士，副教授，主要研究方向为干旱区环境. E-mail: xujunli05@lzb.ac.cn
通讯作者： 王建. E-mail: wjshuigong@163.com

1 数据与方法

1.1 研究区概况

新疆地处欧亚大陆腹部，地貌呈三山（阿尔泰山、天山和昆仑山）夹两盆（准噶尔盆地和塔里木盆地）的特点（图1），山地面积约占50%，其中现代山岳冰川面积达2.65×10^4 km^2。在西风带天气系统作用下，外源水汽主要来自北大西洋和欧亚大陆[16]，平原与山麓带年均降水量多不足200 mm，山区降水量在600 mm以上[8]，在促进沙漠与戈壁地貌广泛分布的同时，也形成了独具特色的山前绿洲经济带，尤其是天山北坡经济带集中了全疆83%的重工业和62%的轻工业[10]。近年来，经济产业迅猛发展，特别是能源产业，其大量排放的污染物引发的环境质量问题备受关注[6,9,11,17]。

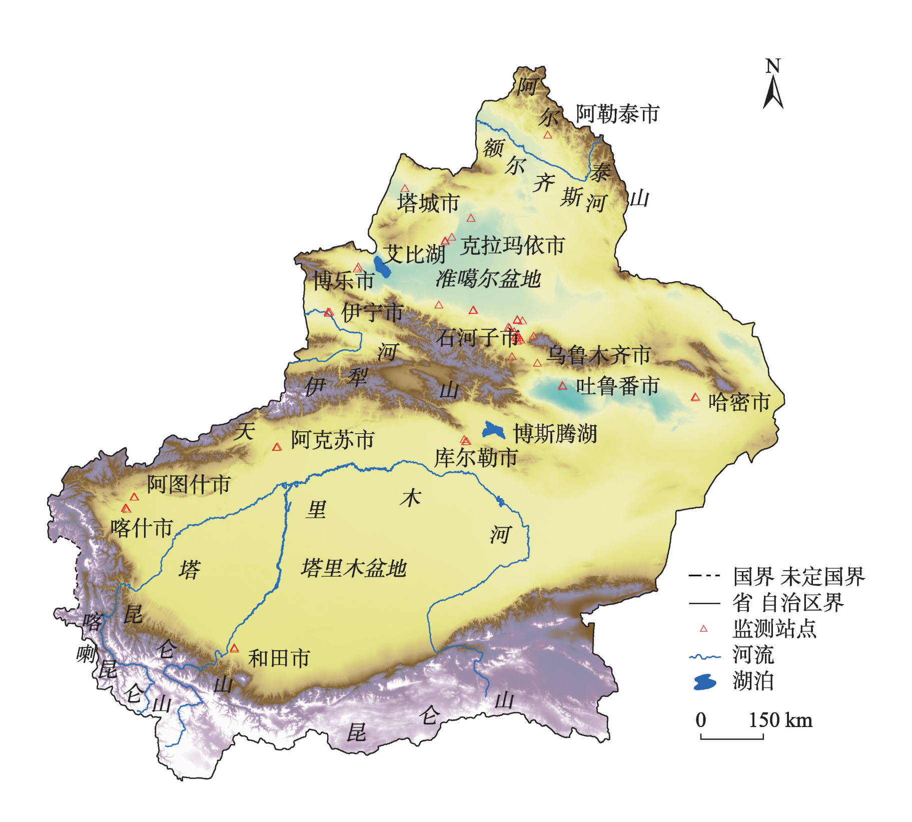
1.2 数据来源

新疆2021年3月—2022年2月间隔1 h的近地层空气质量监测数据（$PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2、CO和O_3），来自中国环境监测总站，不均匀地分布在塔里木盆地（12个站点）和准噶尔盆地（34个站点）边缘的绿洲区（图1）。气团后向轨迹模式使用美国国家环境预报中心的全球资料同化系统（GDAS）0.5°×0.5° 气象数据（ftp://ftp.arl.noaa.gov/pub/archives/gdas1）。

1.3 Hysplit 模式

基于Hysplit模式的MeteoInfo软件包可进行气团后向轨迹聚类分析和潜在贡献源的确定。Hysplit模式是美国海洋与大气研究中心和澳大利亚气象局联合研发的用于计算和分析气团运动、污染物沉降和扩散轨迹的气象模式[7,14,18]。其TrajStat模块具有轨迹聚类、潜在源贡献函数（PSCF）和浓度加权轨迹（CWT）的计算分析功能[7,14]。本文气团后向轨迹聚类分析以每天0:00、4:00、8:00、12:00、16:00和20:00为模拟起始时间，模拟时长48 h，起始高度为500 m[16,19–21]，并使用角距离法对不同季节轨迹进行聚类。PSCF是污染物浓度结合气团后向轨迹来识别潜在源的范围，即$PSCF_{ij}$值定义为经过ij网格的污染轨迹（m_{ij}）条数除以同一网格内总轨迹条数（n_{ij}），公式如下：

$$PSCF_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \tag{1}$$



注：底图采用新疆维吾尔自治区自然资源厅标准地图制作，审图号为新S(2021)023号，对底图边界无修改。下同。

图1 新疆空气质量监测站位置示意图

Fig. 1 Location of stations monitoring air pollution in Xinjiang

CWT是反映不同轨迹的污染程度，通过计算潜在源区气流轨迹权重浓度来获得，公式如下：

$$\mathrm{CWT}_{ij}=\frac{\sum_{l=1}^{M}c_l\tau_{ijl}}{\sum_{i=1}^{M}\tau_{ijl}} \tag{2}$$

式中：CWT_{ij}为ij网格上污染物的平均权重浓度；M为轨迹总数；l为某一轨迹；τ_{ijl}为轨迹l在栅格ij上停留的时间；c_l为轨迹l经过ij栅格所对应的污染物浓度。

另外，w_{ij}是为了降低n_{ij}较小时PSCF_{ij}和CWT_{ij}计算值的不确定性而引入的权重因子。关于MeteoInfo软件包详细的应用信息，请访问 http://www.meteothink.org/docs/ trajstat/cluster_cal.html。

$$w_{ij}=\begin{cases}1.00, & 80<n_{ij}\\ 0.72, & 20<n_{ij}\leqslant 80\\ 0.42, & 10<n_{ij}\leqslant 20\\ 0.05, & n_{ij}\leqslant 10\end{cases} \tag{3}$$

2 结果与分析

区域内阿尔泰山、天山、帕米尔高原和昆仑山等高峻地形的分布在一定程度上可以改变气团运动轨迹方向和物质输送强度[7]，且不均匀分布的沙漠、戈壁和绿洲等不同下垫面，可能造成区域间污染物浓度、组成与演化过程存在显著的分异[22]。为此，对$PM_{2.5}$逐时浓度数据经Z分数法标准化后，采用最短距离法进行聚类分析表明，新疆监测站可分为4大类（区），即额尔齐斯河源区（NA区，1个站点）、哈密盆地（NH区，2个站点）、天山北坡经济带（NB区，31个站点，涵盖乌鲁木齐市、五家渠市、昌吉市、石河子市、克拉玛依市、塔城市、博尔塔拉蒙古自治州和伊犁哈萨克自治州）和塔里木盆地（S区，12个站点，涵盖巴音郭楞蒙古自治州、阿克苏市、和田市、喀什市、克孜勒苏柯尔克孜自治州）。

2.1 总体水平

整体上，新疆$PM_{2.5}$年平均浓度为46.13 μg·m^{-3}（变异系数为69.64%）（表1），远高于世界卫生组织（25 μg·m^{-3}）的健康浓度标准[2]，也比我国环境空气质量标准二级浓度限值（35 μg·m^{-3}）偏高31.8%。其中，NA区$PM_{2.5}$平均浓度最低，为9.07 μg·m^{-3}，NB区与NH区的$PM_{2.5}$平均浓度分别为41.20 μg·m^{-3}和28.28 μg·m^{-3}，而S区$PM_{2.5}$平均浓度最大，为65.01 μg·m^{-3}，是NA区的7倍多，其中和田地区$PM_{2.5}$平均浓度高达98.12 μg·m^{-3}，是我国环境空气质量二级标准的2.8倍，对区域民众存在严重的致病风险[23]。

2.2 季节性差异

冬季（12月至次年2月）新疆$PM_{2.5}$平均浓度高达86.16 μg·m^{-3}（表1），但变异系数较低，说明大陆高压作用下区域气团运动相对稳定[24]，高浓度的细颗粒粉尘扩散缓慢，是区域冬季空气质量差和沙尘暴发生频率较低的原因之一。春（3—5月）秋（9—11月）季节$PM_{2.5}$浓度次之，平均分别为40.30 μg·m^{-3}和39.32 μg·m^{-3}，但变异系数较大，分别为63.27%和52.12%，应是太阳高度角变化下西风带移动性槽、脊明显增多，导致冷空气活动频繁[25]，降低了空气稳定度，促进污染物扩散，但有利于沙尘暴的形成[13]。夏季（6—8月）$PM_{2.5}$浓度平均为18.57 μg·m^{-3}，是冬季的21.55%，浓度变异系数仅为23.95%，应是大陆高压消失与西风带北移，致使孕育沙尘天气发生的西北风减弱[12]、以及较为集中的降水[16]和较好的植被覆盖[26]等因素综合作用的结果。

具体而言，NA区、NB区和NH区与全疆$PM_{2.5}$浓度季节性变化趋势类似，也呈现冬季浓度最高，夏季浓度最低，春、秋季浓度波动较强（变异系数较大）的现象（表1）。尤其是NB区冬季$PM_{2.5}$浓度高达96.12 μg·m^{-3}，约是夏季的7倍，而变异系数仅约为

表1 新疆不同区域$PM_{2.5}$平均浓度及其变异系数的季节性差异

Tab. 1 Seasonal differences of $PM_{2.5}$ concentration mean and coefficient of variation in different regions of Xinjiang

	$PM_{2.5}$浓度均值/(μg·m^{-3})					浓度变异系数/%				
	全疆	NA区	NB区	NH区	S区	全疆	NA区	NB区	NH区	S区
春季	40.3	9.18	26.69	32.16	79.47	63.27	42.30	63.71	150.10	105.57
夏季	18.57	6.90	13.94	15.3	32.2	23.95	26.32	18.42	51.84	47.38
秋季	39.32	7.91	28.07	28.26	73.03	52.12	24.09	57.62	65.59	69.44
冬季	86.16	12.24	96.12	37.16	74.67	28.75	63.43	38.52	34.90	37.22
全年	46.13	9.07	41.2	28.28	65.01	69.64	54.55	94.41	99.78	84.55

春秋季的60%,说明西风带南移后,NB区受大陆冷高压控制以及准噶尔盆地西南缘天山的阻挡作用使空气稳定度较高,在一定程度上限制了能源产业以及生活排放的污染物扩散,符合区域冬季风速偏小及其波动较弱的气候背景[24];而春秋季NB区的变异系数均是夏季的3倍多,说明在西风带南北移动和大陆冷高压的逐渐形成与消退过程中空气稳定度较差,污染物富集与扩散过程变化显著[25]。其次,NH区还受到天山阻挡下自西向东运移的冷空气从地势低洼的吐哈盆地进入塔克拉玛干沙漠东部(东灌天气)的作用,并可能促进塔里木盆地东部偏东大风和沙尘天气的形成[13]。南疆S区夏季$PM_{2.5}$浓度仅约为年均值的50%,而春、秋季和冬季的浓度相近,显著区别于北疆各区。

新疆$PM_{2.5}$平均浓度逐时变化整体呈现双峰型特征(图2),两次峰值分别出现在北京时间10:00—16:00和21:00—2:00,最低谷值分别出现在5:00—10:00和15:00—20:00。但NA区和NB区午时前后的峰值和随之的谷值均不显著,尤其是冬季(图2a和图2b),与北疆地区降水多发生在下午(14:00—18:00)不一致[27],这是因为区域降水量相对较小,频次较少,难以有效地降低季节性时间尺度上的傍晚时的$PM_{2.5}$浓度。区域夜间$PM_{2.5}$浓度偏高而白天浓度偏低是因为北疆地区夜间多稳定层结[28-29],有效地促进来自人类活动的大气污染物积累,而傍晚和清晨中性层结占居主导,尤其是中午多呈现弱不稳定层结现象[30],一定程度上促进了污染物的扩散所致。NH区和S区午夜的$PM_{2.5}$浓度升高不仅是大气稳定度增强所引起,还受到周围山区尤其是青藏高原与盆地之间类山谷风的作用,即塔里木盆地夜间地面降温速率较毗邻的天山山区与青藏高原偏小,冷空气沿坡面下移后致使盆地内气流上升,促进地表细颗粒进入大气[31]。随后受夜间人类排放量减少和干湿沉降作用影响,$PM_{2.5}$浓度逐渐降低。7:00—9:00,人类活动逐渐增强,同时,大气稳定度降低引起扬尘,导致$PM_{2.5}$浓度再次升高。随着太阳高度角增大,周围天山、昆仑山及青藏高原升温速率较盆地(尤其是绿洲区)偏高,(类)山谷风[31]和冰川风[8]促使热空气迁移至盆地上空后沉降,稀释了$PM_{2.5}$浓度,使其在傍晚17:00—20:00达到低谷值。整体上,NH区和S区$PM_{2.5}$浓度午夜出现峰值和清晨出现低谷值的成因类似于北疆NA区和NB区,但傍

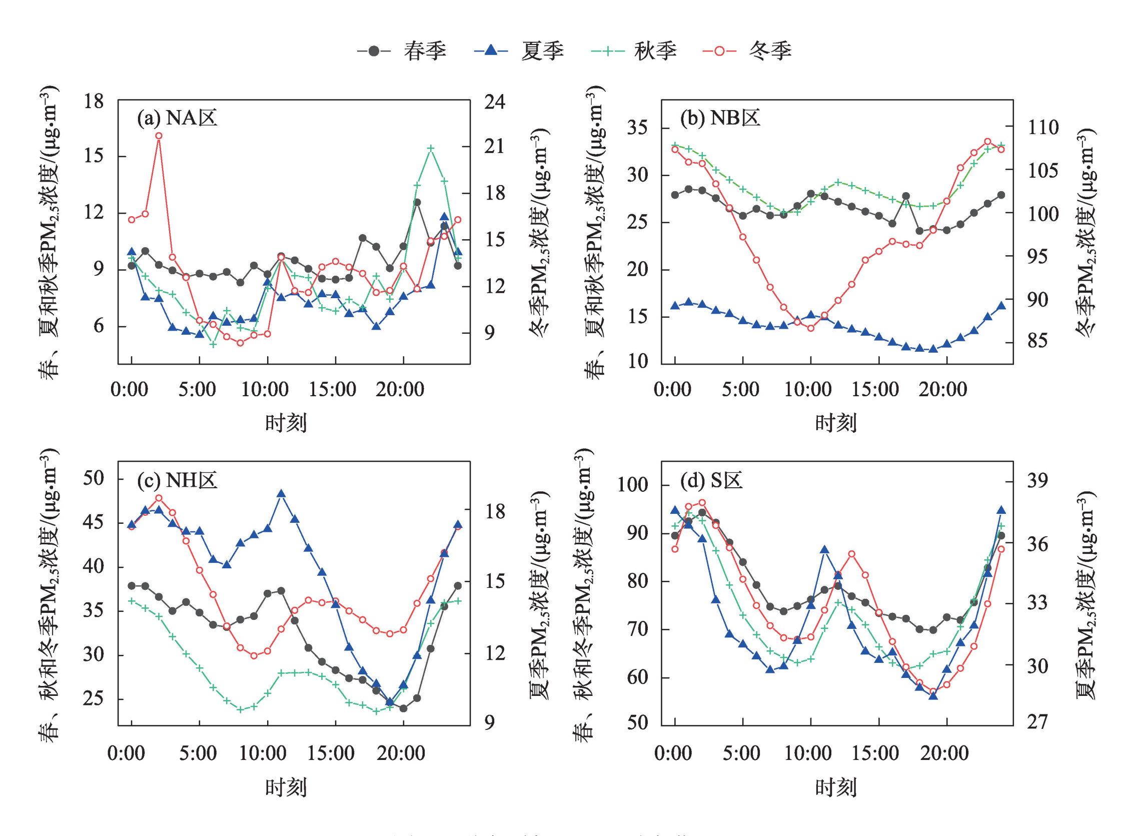


图2　不同区域$PM_{2.5}$逐时变化过程

Fig. 2　Hourly change process of $PM_{2.5}$ in different regions

晚形成低谷值,可能是区域大气环流的结果。

2.3 $PM_{2.5}$排放源

对新疆不同区域污染物浓度逐时数据进行因子分析,经最大方差法旋转后,结合NO_2、SO_2、CO和PM_{10}作为判别大气污染物来源的“指示剂”,分析$PM_{2.5}$的排放源(表2)。其中,NO_2主要是油、气和煤等资源利用的排放,SO_2主要源自燃煤的排放,CO来自于碳氢物质未完全燃烧过程中的排放[15],而PM_{10}在干旱地区主要源自大风扬尘[1,7]。新疆及其各区域内的大气主要污染物公因子(F1、F2和F3)解释方差贡献率为74.22%~93.90%(表2),说明结果具有一定的代表性。

整体上,新疆F1因子解释方差贡献率为41.03%,主要对O_3、NO_2和CO荷载,说明石油和天然气等能源燃烧对空气质量起支配作用,但仅对部分$PM_{2.5}$荷载。石油和天然气燃烧过程除直接排放$PM_{2.5}$外,其排放的NO_2还是间接形成$PM_{2.5}$的前体物质之一[10,32],与当前新疆以石油和天然气资源开采和加工的现状相吻合。F2因子主要对$PM_{2.5}$和PM_{10}荷载,解释方差贡献率为29.41%,与大风扬沙的干旱半干旱地区自然环境现状一致[33-34]。F3因子解释方差贡献率为20.51%,荷载显著的呈现在SO_2方面,并对NO_2、CO和$PM_{2.5}$也有少量荷载,表明区域电力、金属矿产提炼以及日常生活等燃煤排放对污染物的补给作用。这种以大风扬尘为主、辅以石油与天然气燃烧排放作用对区域$PM_{2.5}$浓度影响的现象主要呈现在人类活动较弱的S区、NA区和NH区。

NB区$F1_{NB}$因子解释方差贡献率为41.58%,显著荷载于$PM_{2.5}$、PM_{10}、CO和NO_2,应是克拉玛依、独山子、玛北和乌尔禾等大型油、气田作业排放后,通过气流输送至绿洲区监测站过程中,大风扬尘在一定程度上增强了$PM_{2.5}$和PM_{10}浓度的结果。$F2_{NB}$因子解释方差贡献率为32.16%,主要荷载于O_3和CO方面,并部分荷载于NO_2和$PM_{2.5}$方面,应取决于天山北坡以乌鲁木齐-昌吉-石河子-克拉玛依-伊犁为干线的经济带交通(汽车)和日常生活等排放。另外,与新疆其他区域一样,煤炭燃烧排放的$PM_{2.5}$量占比相对较少。

2.4 潜在贡献区分析

受西风气流控制外,因地形、太阳高度角和冬季大陆高压等因素的影响,研究区$PM_{2.5}$迁移路径还受局地气流的作用[7](图3)。其中北疆NA区西向路径(路径1,2和3)占比高达80.81%,输送$PM_{2.5}$浓度(以路径占比为权重)平均仅为9.36 $\mu g \cdot m^{-3}$,略低于局地路径4(10.20 $\mu g \cdot m^{-3}$)(图3a和表3),说明区域人类活动排放的污染物对环境质量的影响几乎可以忽略。NB区经塔城和古尔班通古特沙漠西部的路径1占比21.08%(图3b),输送$PM_{2.5}$浓度仅为26.25 $\mu g \cdot m^{-3}$,略低于经克拉玛依和奎屯附近占比约50%的路径2输送$PM_{2.5}$浓度(33.85 $\mu g \cdot m^{-3}$);经伊犁并翻越天山的路径3和局地环流路径4占比分别为11.44%和16.65%,输送的$PM_{2.5}$浓度分别高达62.77 $\mu g \cdot m^{-3}$和67.90 $\mu g \cdot m^{-3}$,这与区域轻、重工业分别占全疆62%和83%的产业布局相一致[10],说明人为污染物排放是影响天山北坡经济带空气质量的关键因素[35]。需要说明的是路径2输送$PM_{2.5}$浓度虽然分别仅约为路径3和4浓度的53.9%和49.9%,但路径占比分别是二者的4.4倍和3.1倍,为此,途经石油与天然气开采区及泥炭分布区的路径2也应是区域$PM_{2.5}$来源的重要通道;并且路径2输送$PM_{2.5}$浓度的变异系数显著高于其他路径,意味着此路径污染物浓度变化剧烈,既可能稀释NB区污染物浓度,也可

表2 新疆不同区域大气主要污染物的因子分析

Tab. 2 Factor analysis results of major atmospheric pollutants in different regions of Xinjiang

	新疆			S区			NA区			NB区			NH区		
	F1	F2	F3	$F1_S$	$F2_S$	$F3_S$	$F1_{NA}$	$F2_{NA}$	$F3_{NA}$	$F1_{NB}$	$F2_{NB}$	$F3_{NB}$	$F1_{NH}$	$F2_{NH}$	$F3_{NH}$
$PM_{2.5}$	0.44	0.79	0.30	0.15	0.97	0.10	0.20	0.83	0.05	0.91	0.31	0.15	0.18	0.96	0.06
NO_2	0.88	0.22	0.29	0.88	0.02	0.39	0.74	0.15	0.41	0.78	0.48	0.22	0.93	0.03	−0.02
O_3	−0.92	−0.18	−0.03	−0.94	−0.20	−0.12	−0.84	−0.03	−0.14	−0.20	−0.94	0.03	−0.91	−0.12	−0.09
CO	0.76	0.37	0.39	0.73	0.07	0.57	0.74	0.13	−0.18	0.76	0.56	0.16	0.83	0.06	0.10
SO_2	0.21	0.13	0.95	0.33	0.01	0.93	0.07	0.14	0.93	0.18	0.06	0.98	0.09	0.05	0.99
PM_{10}	0.15	0.95	0.04	0.05	0.98	−0.06	0.01	0.86	0.14	0.90	0.19	0.13	−0.01	0.98	0.01
解释方差/%	41.03	29.41	20.51	38.74	32.46	22.70	30.98	24.75	18.49	41.58	32.16	17.95	40.49	31.63	16.82

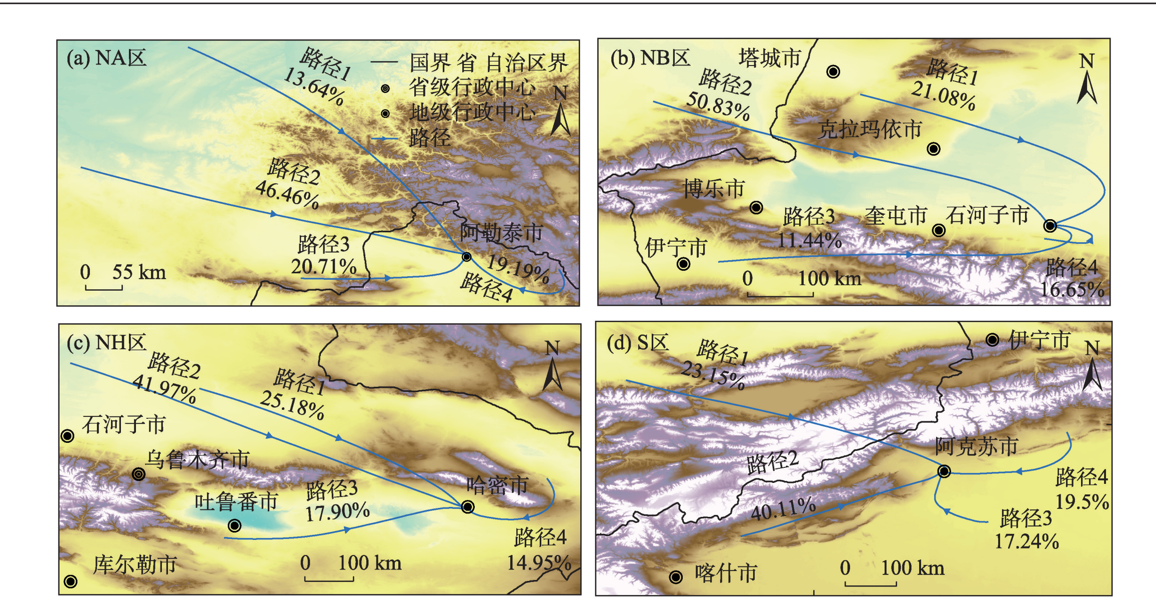


图3　新疆不同区域 $PM_{2.5}$ 的主要来源通道

Fig. 3　Main transport channels of $PM_{2.5}$ in different regions of Xinjiang

能促进污染物浓度进一步升高。

NH区途经古尔班通古特沙漠并翻越天山进入吐哈盆地的路径1和2占比分别为25.18%和41.97%(图3c)，输送 $PM_{2.5}$ 浓度分别为27.57 μg·m^{-3}和28.35 μg·m^{-3}(表3)，接近世界卫生组织(25 μg·m^{-3})的健康标准[2]，但受西北大风频发的影响，浓度变异系数分别高达147.26%和124.09%，也侧向表明了区域沙尘暴的成因[36-38]。自塔里木盆地经吐哈盆地的路径3和东北向路径4占比分别为17.90%和14.95%，输送 $PM_{2.5}$ 浓度分别为33.92 μg·m^{-3}和22.78 μg·m^{-3}，前者虽然受塔里木盆地扬尘作用，具有较高 $PM_{2.5}$ 浓度，但变异系数偏低，显著区别于近似反向的S区路径4高达130%的变异系数，意味着NH区沙尘暴的形成受塔克拉玛干沙漠风扬沙尘作用是有限的，也是导致NH区与S区 PM_{10} 高值段不一致的重要因素[22]。

S区中路径1与2占比分别为23.15%和40.11%(图3d)，前者主要途经伊塞克湖以及金矿、铜矿和锡矿等工业地的卡拉科尔后在托木尔峰南侧翻越天山南脉抵达研究区，而后者沿昆马力克河河谷[8]经天山南脉山麓带抵达研究区，但前者输送 $PM_{2.5}$ 浓度(51.34 μg·m^{-3})较人类活动分布较少的后者(63.43 μg·m^{-3})低约19%，这是路径1气流在翻越天山南脉过程中细颗粒物干湿沉降的结果[33]。逆沿塔里木河途经阿拉尔市和阿瓦提县的路径3和沿天山南麓途经库车县、新和县和却勒塔格的路径4占比分别为17.24%和19.50%，输送 $PM_{2.5}$ 浓度分别高达70.24 μg·m^{-3}和80.67 μg·m^{-3}，是区域细颗粒物的重要来源通道。其中路径4荷载的 $PM_{2.5}$ 浓度变异系数高达130%，也是天山阻挡下准噶尔盆地中冷高压空气经吐哈盆地进入塔克拉玛干沙漠东部造成东北大风频发的结果[13]。

进一步分析PSCF表明，NA区 $PM_{2.5}$ 潜在贡献源区多限于1000 km之内(PSCF > 0.7，图4a)，而CWT分析表明，主要贡献源区的 $PM_{2.5}$ 浓度显著偏低(图

表3　不同区域与路径源的 $PM_{2.5}$ 平均浓度和变异系数对比

Tab. 3　Comparison of mean and coefficient of variation of $PM_{2.5}$ concentration of different route sources

路径	NA区			NB区			NH区			S区		
	路径占比/%	平均值/(μg·m^{-3})	变异系数/%	路径占比/%	平均值/(μg·m^{-3})	变异系数/%	路径占比/%	平均值/(μg·m^{-3})	变异系数/%	路径占比/%	平均值/(μg·m^{-3})	变异系数/%
1	13.64%	8.93	82.64%	21.08%	26.25	86.13%	25.18%	27.57	147.26%	23.15%	51.34	68.60%
2	46.46%	9.78	85.89%	50.83%	33.85	103.60%	41.97%	28.35	124.09%	40.11%	63.43	57.28%
3	20.71%	8.71	75.55%	11.44%	62.77	60.71%	17.90%	33.92	59.11%	17.24%	70.24	77.22%
4	19.19%	10.2	75.59%	16.65%	67.9	75.68%	14.95%	22.78	67.95%	19.50%	80.67	130.00%

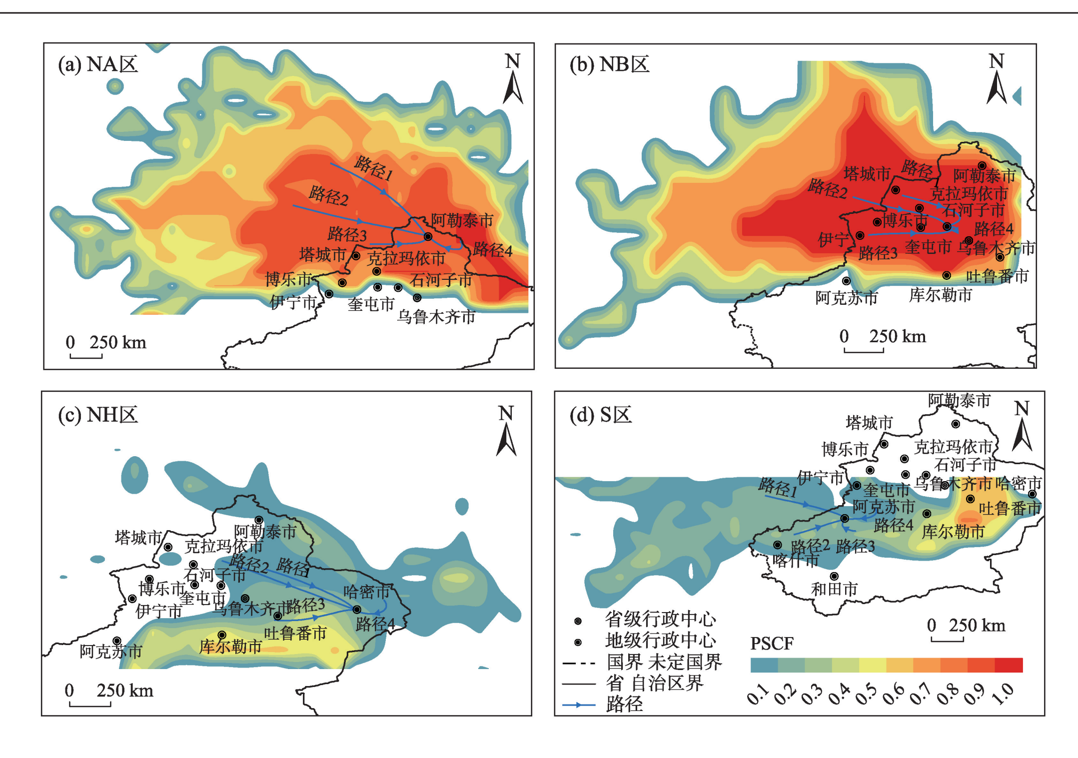


图4 新疆不同区域 $PM_{2.5}$潜在源贡献区分布

Fig. 4 Distribution of $PM_{2.5}$ potential source contribution in different regions of Xinjiang

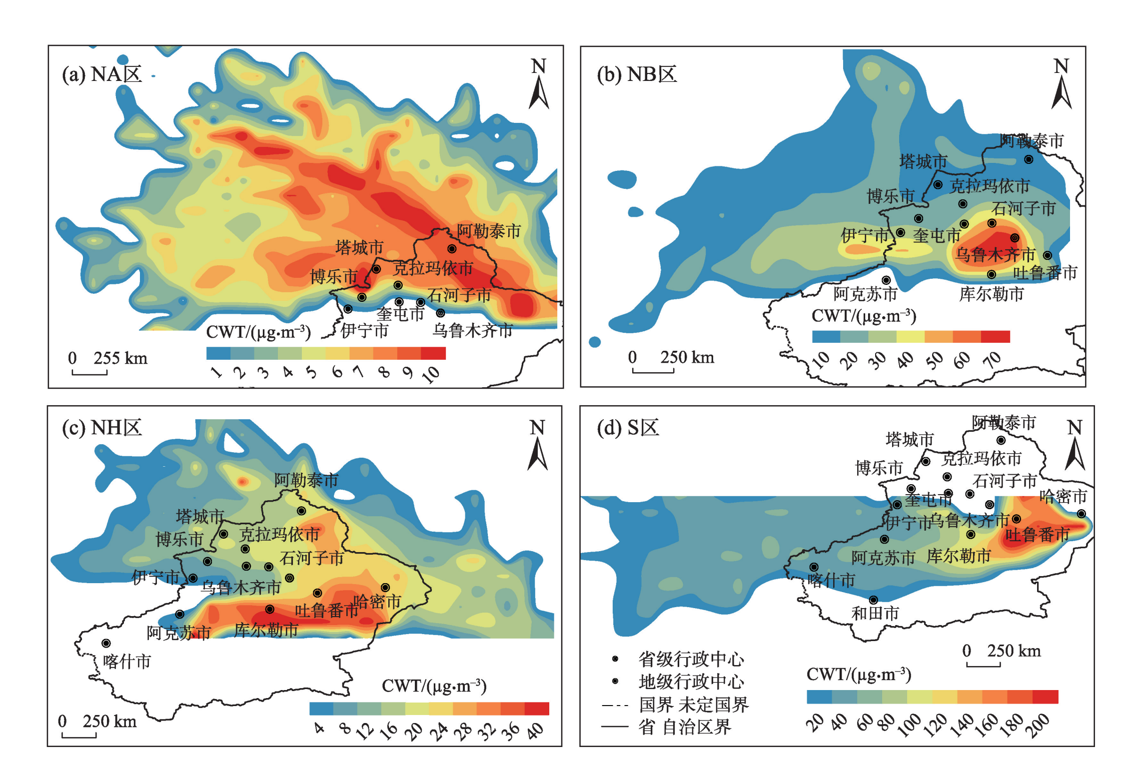


图5 新疆不同区域 $PM_{2.5}$浓度权重轨迹的空间格局

Fig. 5 Spatial pattern of $PM_{2.5}$ concentration weight trajectories in different regions of Xinjiang

5a)，进一步说明人类活动对环境质量的影响可以忽略。NB区 $PM_{2.5}$潜在贡献源区局限于800 km之内的准葛尔盆地(图4b)，而CWT分析表明，浓度偏高的 $PM_{2.5}$主要源自乌鲁木齐、昌吉和吐鲁番等天山北坡人类活动强烈的经济带(图5b)，这与区域 $PM_{2.5}$主要来源于石油和天然气产业排放，并辅以大风扬尘补给的因子分析结果相一致。NH区 $PM_{2.5}$潜在贡献源区(PSCF＞0.5)多限于塔里木河下游干燥的孔雀河

流域和罗布泊区域,与CWT分析高浓度细颗粒物的贡献区显著重叠,说明区域$PM_{2.5}$主要受风沙补给支配,符合上述因子分析中$PM_{2.5}$主要源于大风扬尘的结果。S区PSCF(PSCF > 0.7)和CWT(> 100 μg·m^{-3})分析表明,$PM_{2.5}$潜在贡献源区多限于塔克拉玛干沙漠东缘的孔雀河流域、罗布泊和吐鲁番盆地南缘,而非塔里木盆地内的广大沙漠分布区,与NH区存在显著的重合现象,这可能是因河流泥沙远距离输送的影响,物质粒径相对较小,造就了区域细颗粒物质的重要源地;另外,横贯新疆东西走向的天山山脉在吐库铁路以东地区逐渐低平,形成塔里木盆地内外气流快速交换的重要通道,也是促进区域沙尘天气,尤其是沙尘暴形成的重要因素[7,22,36]。

2.5 地形因素

地形和下垫面植被覆盖方式通过改变气流的方向和速度可以导致大气污染物输送过程发生显著变化[39]。为此,除了考虑大气因素外,地形也是分析$PM_{2.5}$浓度的关键因素之一[14,18]。由图1可知,新疆地貌复杂,整体呈三山夹两盆格局,其中天山山脉整体呈东西走向的同时,在两侧盆地的西缘向南北方向延伸。

受西风带作用外源气流多源自西向(图3,表3),翻越天山后形成的焚风在一定程度上促进盆地气候干燥[40],并可引起地表植被覆盖恶化,加速区域粉尘源的形成;另一方面,辅以山谷风和冰川风作用的翻越天山的气流温度相对较低,是促进盆地边缘绿洲区形成逆温层概率增大的重要因素,一定程度上抑制了区域污染物质沉降与扩散。因此,独特的地形因素应是导致NB区和S区$PM_{2.5}$平均浓度分别高达41.20 μg·m^{-3}(变异系数为94.41%)和65.01 μg·m^{-3}(变异系数为84.55%)的重要因素之一。其次,即使气团污染非常严重,在翻越高大山脉的过程中因沿途干湿沉降,污染物含量一般相对较低,但NB区和S区的西向路径1,2,3携带$PM_{2.5}$细颗粒物质的浓度分别高达35.90 μg·m^{-3}和61.41 μg·m^{-3}(路径占比为权重),可能是气流受盆地地形作用而呈现辐合/辐散状气流[31],辅以山谷风和冰川风作用下,外源气团混合盆地内大量自然与人为补给的颗粒物质的结果[41-42]。

需要说明的是塔里木盆地东侧罗布泊与吐鲁番盆地交汇区,地势相对平坦,不仅是连接塔里木盆地与准噶尔盆地气流的重要通道[7,31],也是盆地内污染物外溢东进而影响哈密地区$PM_{2.5}$浓度的重要途径。

3 结 论

(1) 新疆$PM_{2.5}$浓度显著偏高,尤其是冬季,对人类存在严重的健康威胁。受大气稳定度影响,$PM_{2.5}$浓度呈现昼低夜高的现象,但辅以(类)山谷风作用,在哈密盆地和塔里木盆地呈显著的双峰型。

(2) $PM_{2.5}$源于大风扬尘,辅以油气燃烧和较少燃煤排放的现象,呈现于人类活动较弱的额尔齐斯河源区、哈密盆地和塔里木盆地,而天山北坡经济带$PM_{2.5}$主要受控于周围大型油气田作业排放及其输送过程中的大风扬尘,并辅以交通和日常生活等排放。

(3) 新疆$PM_{2.5}$迁移路径受西风气流支配外,还受局地气流的影响。其中天山北坡经济带中途经油、气开采区,气流荷载$PM_{2.5}$的浓度变化剧烈,是导致$PM_{2.5}$浓度进一步升高甚至浮尘天气的重要成因。另外,天山阻挡下准噶尔盆地中冷高压空气经吐哈盆地进入塔里木盆地东部造成偏北大风频发,是塔里木盆地$PM_{2.5}$浓度偏高及沙尘暴形成的重要因素。

参考文献(References):

[1] Almeida S M, Manousakas M, Diapouli E, et al. Ambient particulate matter source apportionment using receptor modelling in European and Central Asia urban areas[J]. Environmental Pollution, 2020, 266: 115199.

[2] EEA. Air Quality in Europe 2018 Report [R]. European Environment Agency, 2018: 1977-8449.

[3] Atkinson R W, Cohen A, Mehta S, et al. Systematic review and meta-analysis of epidemiological time-series studies on outdoor air pollution and health in Asia[J]. Air Quality Atmosphere and Health, 2012, 5: 383-391.

[4] 张书源, 程全国, 邢红彬. 基于数据挖掘技术的$PM_{2.5}$污染与居民死亡人数的暴露 - 反应关系[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2022, 34(1): 17-23. [Zhang Shuyuan, Cheng Quanguo, Xing Hongbin. Exposure-response relationship between $PM_{2.5}$ pollution and death toll of residents based on data mining technology[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2022, 34(1): 17-23.]

[5] Stanaway J D, Afshin A, Gakidou E, et al. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for

195 countries and territories, 1990-2017: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. Lancet, 2018, 392 (10159): 1923-1994.

[6] 亚力昆江·吐尔逊, 迪丽努尔·塔力甫, 阿不力克木·阿布力孜, 等. 乌鲁木齐市采暖期大气 $PM_{2.5}$、$PM_{10-2.5}$中重金属污染水平评价[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2010, 27(3): 338-342. [Yalkunjan Tursun, Dilnur Talifu, Ablikim Ablizi, et al. Pollution level of heavy metals in $PM_{2.5}$ and $PM_{10-2.5}$ during winter in Urumqi[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2010, 27(3): 338-342.]

[7] Yu H, Yang W, Wang X H, et al. A seriously sand storm mixed air-polluted area in the margin of Tarim Basin: Temporal-spatial distribution and potential sources[J]. Science of the Total Environment, 2019, 676: 436-446.

[8] 王建, 韩海东, 许君利, 等. 天山科其喀尔冰川末端降水化学特征及控制因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 347-358. [Wang Jian, Han Haidong, Xu Junli, et al. Chemical characteristics and their influencing factors of precipitation at the end of the Koxkar Glacier, Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 347-358.]

[9] Hu H, Zhao X Y, Wang J, et al. Chemical characteristics of road dust $PM_{2.5}$ fraction in oasis cities at the margin of Tarim Basin[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 95: 217-224.

[10] 刘琳, 张正勇, 刘芬, 等. 天山北坡经济带城市 $PM_{2.5}$质量浓度时空分布及模拟分析[J]. 环境科学研究, 2018, 31(11): 1849-1857. [Liu Lin, Zhang Zhengyong, Liu Fen, et al. Spatial-temporal distribution and simulation analysis of $PM_{2.5}$ concentration of the cities in the northern slope economic zone of Tianshan Mountain [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(11): 1849-1857.]

[11] Liu Y X, Teng Y, Liang S, et al. Establishment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ emission inventories from wind erosion source and simulation of its environmental impact based on WEPS-Models3 in southern Xinjiang, China[J]. Atmospheric Environment, 2021, 248: 118222.

[12] Meng L, Yang X H, Zhao T L, et al. Modeling study on three-dimensional distribution of dust aerosols during a dust storm over the Tarim Basin, Northwest China[J]. Atmospheric Research, 2019, 218: 285-295.

[13] 马明杰, 何清, 杨兴华, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘沙尘天气起沙量的贡献研究[J]. 干旱区资源与环境,2022, 36(7): 133-138. [Ma Mingjie, He Qing, Yang Xinghua, et al. Contributions of dusty weather to dust emission amounts at the northern argin of the Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(7): 133-138.]

[14] Ge Y X, Abuduwaili J, Ma L, et al. Potential transport pathways of dust emanating from the playa of Ebinur Lake, Xinjiang, in arid Northwest China[J]. Atmospheric Research, 2016, 178: 196-206.

[15] 段时光, 姜楠, 杨留明, 等. 郑州市冬季大气 $PM_{2.5}$ 传输路径和潜在源分析[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 86-93. [Duan Shiguang, Jiang Nan, Yang Liuming, et al. Transport pathways and potential sources of $PM_{2.5}$ during the winter in Zhengzhou[J]. Environmental Science, 2019, 40(1): 86-93.]

[16] Huang W, Chang S Q, Xie C L, et al. Moisture sources of extreme summer precipitation events in north Xinjiang and their relationship with atmospheric circulation[J]. Advances in Climate Change Research, 2017, 8(1): 12-17.

[17] 高卫东. 新疆土壤元素含量特征及其对沙尘气溶胶贡献分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(8): 155-158. [Gao Weidong. Analysis on element content in Xinjiang soil and contribution to dust aerosol[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(8): 155-158.]

[18] Salmabadi H, Saeedi M. Determination of the transport routes of and the areas potentially affected by SO_2 emanating from Khatoonabad copper smelter (KCS), Kerman province, Iran using HYSPLIT [J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, 10(1): 321-333.

[19] Zhang L, Shen F Z, Gao J L, et al. Characteristics and potential sources of black carbon particles in suburban Nanjing, China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2020, 11(5): 981-991.

[20] Rupakheti D, Rupakheti M, Abdullaev S F, et al. Columnar aerosol properties and radiative effects over Dushanbe, Tajikistan in Central Asia[J]. Environmental Pollution, 2020, 265: 114872.

[21] Fedkin N M, Li C, Dickerson R R, et al. Linking improvements in sulfur dioxide emissions to decreasing sulfate wet deposition by combining satellite and surface observations with trajectory analysis[J]. Atmospheric Environment, 2019, 199: 210-223

[22] 刘新春, 钟玉婷, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地及周边地区 PM_{10}时空变化特征及影响因素分析[J].中国沙漠, 2011, 31(2): 323-330. [Liu Xinchun, Zhong Yuting, He Qing, et al. Spatio-temporal pattern of PM_{10} concentration and impact factors in the hinterland and surrounding area of Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(2): 323-330.]

[23] 熊欢欢, 梁龙武, 曾赠, 等. 中国城市 $PM_{2.5}$时空分布的动态比较分析[J]. 资源科学, 2017, 39(1): 136-146. [Xiong Huanhuan, Liang Longwu, Zeng Zeng, et al. Dynamic analysis of $PM_{2.5}$ spatial-temporal characteristics in China[J]. Resources Science, 2017, 39 (1): 136-146.]

[24] 金莉莉, 李振杰, 何清, 等.乌鲁木齐市城区和郊区近地层风速廓线[J]. 中国沙漠, 2017, 37(4): 755-769. [Jin Lili, Li Zhenjie, He Qing, et al. Surface layer wind speed profiles in center and suburbs of Urumqi, China[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(4): 755-769.]

[25] 陶健红. 西北地区沙尘天气的时空特征及影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 327-334. [Tao Jianhong. Spatial-temporal characteristics of sand-dust events and influencing factors in Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(2): 327-334.]

[26] 马勇刚, 黄粤. 基于1982—2013年NDVI数据的新疆30年植被状况季节与年际趋势分析[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(1): 26-36. [Ma Yonggang, Huang Yue. Interannual and seasonal

trend analysis of vegetation condition in Xinjiang based on 1982–2013 NDVI data[J]. Climatic and Environmental Research, 2018, 23(1): 26–36.]

[27] 陈春艳, 王建捷, 唐冶, 等. 新疆夏季降水日变化特征[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 72–85. [Chen Chunyan, Wang Jianjie, Tang Ye, et al. Diurnal variations of summer precipitation in Xinjiang[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(1): 72–85.]

[28] Bahtebay J, Zhang F, Ariken M, et al. Evaluation of the coordinated development of urbanization- resources- environment from the incremental perspective of Xinjiang, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 325: 129309.

[29] Gu H H, Wang G H, Zhu W, et al. Gusty wind disturbances and large-scale turbulent structures in the neutral atmospheric surface layer[J]. Science China (Physics, Mechanics & Astronomy), 2019, 62(11): 114711.

[30] 杨梅, 李岩瑛, 张春燕, 等. 河西走廊中东部春季沙尘暴变化特征及其典型个例分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1339–1349. [Yang Mei, Li Yanying, Zhang Chuanyan, et al. Variation characteristics of spring sandstorm and its typical case analysis in the middle east of Hexi Corridor[J]. Arid Land Geography, 2021, 44 (5): 1339–1349.]

[31] 徐祥德, 王寅钧, 魏文寿, 等. 特殊大地形背景下塔里木盆地夏季降水过程及其大气水分循环结构[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(2): 1–11. [Xu Xiangde, Wang Yinjun, Wei Wenshou, et al. Summertime precipitation process and atmospheric water cycle over Tarim Basin under the specific large terrain background[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2014, 8(2): 1–11.]

[32] Zhao Z Y, Cao F, Fan M Y, et al. Nitrate aerosol formation and source assessment in winter at different regions in Northeast China [J]. Atmospheric Environment, 2021, 267: 118767.

[33] 宋友桂, 宗秀兰, 李越, 等. 中亚黄土沉积与西风区末次冰期快速气候变化[J]. 第四纪研究, 2019, 39(3): 535–548. [Song Yougui, Zong Xiulan, Li Yue, et al. Loess sediments and rapid climate oscillation during the last glacial period in the westerlies-dominated Central Asia[J]. Quaternary Sciences, 2019, 39(3): 535–548.]

[34] 张喆, 丁建丽, 王瑾杰. 艾比湖地区气溶胶光学特性分析[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3484–3491. [Zhang Zhe, Ding Jianli, Wang Jinjie. Aerosol optical properties over the Ebinur region[J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3484–3491.]

[35] 刘子龙, 代斌, 崔卓彦, 等. 大气污染物浓度变化特征及潜在源分析——以乌鲁木齐为例[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 562–569. [Liu Zilong, Dai Bin, Cui Zhuoyan, et al. Concentration characteristics and potential source of atmospheric pollutants: A case study in Urumqi[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 562–569.]

[36] 杨晓玲, 李岩瑛, 陈静, 等. 河西走廊罕见强沙尘天气传输及其过程持续特征[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1415–1425. [Yang Xiaoling, Li Yanying, Chen Jing, et al. Transmission of rare strong dust and its process continuous characteristics in Hexi Corridor [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1415–1425.]

[37] Chen X L, Song Y G, Li Y, et al. Provenance of sub-aerial surface sediments in the Tarim Basin, Western China[J]. Catena, 2021, 198: 105014.

[38] Zhou C L, Yang F, Mamtimin A, et al. Wind erosion events at different wind speed levels in the Tarim Basin[J]. Geomorphology, 2020, 369: 107386.

[39] Carvalho A C, Carvalho A, Gelpi I, et al. Influence of topography and land use on pollutants dispersion in the Atlantic coast of Iberian Peninsula[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40: 3969–3982.

[40] Li X, Xia X G, Zhong S Y, et al. Shallow foehn on the northern leeside of Tianshan Mountains and its influence on atmospheric boundary layer over Urumqi, China: A climatological study[J]. Atmospheric Research, 2020, 240: 104940.

[41] Wang W, Samat A, Abuduwaili J, et al. Temporal characterization of sand and dust storm activity and its climatic and terrestrial drivers in the Aral Sea region[J]. Atmospheric Research, 2022, 275: 106242.

[42] Sun W T, Gao X, Lei J Q. Shaping effects of sand flow channels on aeolian geomorphology-a case study of the Badain Jaran, Tengger, and Ulan Buh Deserts, northern China[J]. Catena, 2022, 214: 106255.

Recharge sources and potential source areas of atmospheric $PM_{2.5}$ in Xinjiang

XU Junli[1], HAN Haidong[2], WANG Jian[1]

(1. North Jiangsu Institute of Agricultural and Rural Modernization, Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, Jiangsu, China; 2. Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Using the air pollutant mass concentration data in Xinjiang from March 2021 to February 2022, the evolution characteristics of $PM_{2.5}$ concentration and its potential contribution source area were analyzed. The results showed that: (1) The concentration of $PM_{2.5}$ in Xinjiang was significantly high, especially in winter, the average was as high as 86.16 $\mu g \cdot m^{-3}$, which had certain potential risks to human health. Influenced by the near-surface air stability, the $PM_{2.5}$ concentration was higher at nighttime and lower in the daytime, but supplemented by (similar) valley winds, the $PM_{2.5}$ concentration exhibited a significant double-peak pattern in the Hami Basin and the Tarim Basin. (2) The $PM_{2.5}$ in the economic belt of the northern slope of the Tianshan Mountains was mainly dominated by the emission from the surrounding oil and gas fields and the dust from strong winds during the transportation process, while the source of $PM_{2.5}$ in other areas, where human activities were relatively weak, was mainly controlled by the dust from strong winds, supplemented by the combustion of oil and natural gas. (3) The overall low concentration of $PM_{2.5}$ in each path in the source region of the Irtysh River indicates that the impact of pollutants on environmental quality could be ignored. The high concentration of $PM_{2.5}$ in the NB area was mainly affected by the local atmospheric circulation, but the airflow passing through the oil and gas industry area was a key factor leading to the formation of haze and floating dust weather. Although there are differences in the material supply paths between the Hami Basin and the Tarim Basin, their $PM_{2.5}$ potential contribution source areas were all mainly distributed in the Kongqi River Basin and Lop Nur on the eastern edge of the Taklimakan Desert. (4) Exogenous airflow evolved into convergent/divergent airflow due to the topography of the basin, supplemented by (quasi) valley winds to promote the mixing of pollutants, which could be the key factor for the similar evolution trend of $PM_{2.5}$ in the economic belt of the northern slope of the Tianshan Mountains and Tarim Basin.

Keywords: $PM_{2.5}$; cluster analysis; Hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory (Hysplit) model; potential contribution source area; Xinjiang